

Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

**Fenômeno de Ferro-Ressonância em
Transformadores Monofásicos**

Cláudio de Sá Soares

Campina Grande

Agosto de 2005



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Cláudio de Sá Soares

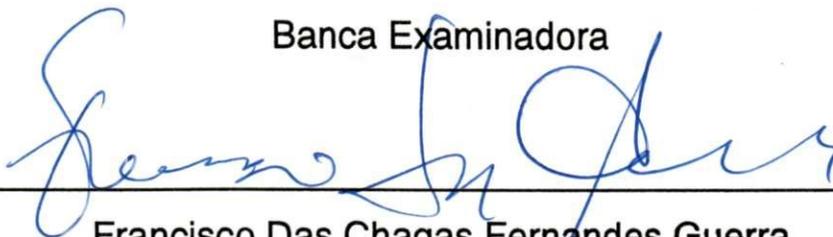
Trabalho de Conclusão de Curso

**Fenômeno de Ferro-Ressonância em
Transformadores Monofásicos**

Relatório apresentado à Coordenação de
Graduação em Engenharia Elétrica da
UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de 2005

Banca Examinadora



Francisco Das Chagas Fernandes Guerra
Orientador:



Luís Reyes Rosales Montero
Professor Convidado

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Metodologia	1
1.3 Descrição Geral do Fenômeno	1
2. Análise Fasorial do Fenômeno	3
3. Equacionamento	7
4. Resultados Obtidos	9
4.1 Caracterização do Transformador Monofásico	9
4.2 Determinação das Condições Iniciais	12
4.3 Medições de Tensões e Correntes	13
5. Conclusões	17
Referências Bibliográficas	18
Anexo	19

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e por todas as glórias que tem realizado na minha vida. Agradeço a meus pais que sempre estiveram e sempre estarão comigo em todos os momentos, sejam tristes, sejam felizes, sejam difíceis, sejam gloriosos; sem eles, não seria nada do que sou hoje. Em especial, à minha avó materna, que mesmo não estando mais conosco, sempre estará na minha lembrança e no meu coração. Aos meus irmãos dedico uma parcela deste trabalho, pois em nenhum momento desacreditaram na minha vitória. A Vanuza, fantástica companheira de todos os momentos desta minha caminhada, que me ensinou o verdadeiro sentido da palavra perseverança. Agradecimento especial dedico ao professor e orientador Francisco das Chagas Guerra com quem tive o prazer de pesquisar e aprender.

1. Introdução

1.1 Objetivos

Objetiva-se estudar o comportamento de um circuito *RLC* não-linear em regime de ferro-ressonância, composto pela associação de uma fonte de tensão senoidal, de um capacitor e de um transformador com o enrolamento secundário em aberto. Serão efetuadas comparações entre resultados experimentais com resultados de simulações em computador.

1.2. Metodologia

As etapas experimentais são:

(a) Caracterização de um transformador monofásico.

- Medição de resistência e reatância dos enrolamentos.
- Levantamento das curvas de saturação (tensão *RMS* – corrente *RMS*, fluxo de enlace *versus* corrente de excitação).
- Levantamento do laço de histerese em 60 Hz.
- Levantamento da curva de perdas magnéticas em função da tensão.
- Processamento dos dados (ajuste de curvas).

(b) Obtenção de oscilogramas de tensões e correntes em laboratório.

(c) Desenvolvimento de modelo de circuito;

(d) Simulações em computador.

(e) Análise dos resultados.

(f) Elaboração de relatório.

1.3 Descrição Geral do Fenômeno

Um sistema elétrico de potência é tão mais confiável quanto menor for a frequência de interrupções de suprimento de energia ao consumidor. Em conseqüência, faz-se necessário um estudo mais detalhado das anormalidades que podem dar origem a alterações pronunciadas nos níveis de tensão e de corrente.

O termo ferro-ressonância nomeia um fenômeno próprio dos circuitos que contêm capacitores e elementos com núcleos magnéticos saturáveis. O exemplo mais simples de um circuito ferro-ressonante consiste em uma associação em série de um indutor saturável e de um capacitor, ligados a uma fonte de tensão senoidal. Durante o regime de ferro-ressonância, há uma variação rápida e descontínua nas amplitudes e fases da corrente e das tensões normais de operação, de modo a ser alcançado um estado caracterizado por formas de ondas não-senoidais, com valores de pico pronunciados, de modo a colocar em risco a integridade dos equipamentos. Tais formas de onda podem conter componentes de frequências múltiplas ou sub-múltiplas da frequência de excitação (harmônicas e sub-harmônicas).

Outra consequência da ferro-ressonância é o estabelecimento de um sobrefluxo no núcleo do transformador, que causa aquecimento excessivo pelo aumento das perdas parasíticas.

Um caso prático de ferro-ressonância ocorre em sistemas de distribuição de energia elétrica, quando há a abertura de uma das fases de uma linha ligada a um transformador com enrolamento secundário em vazio, como é mostrado na Fig. 1.

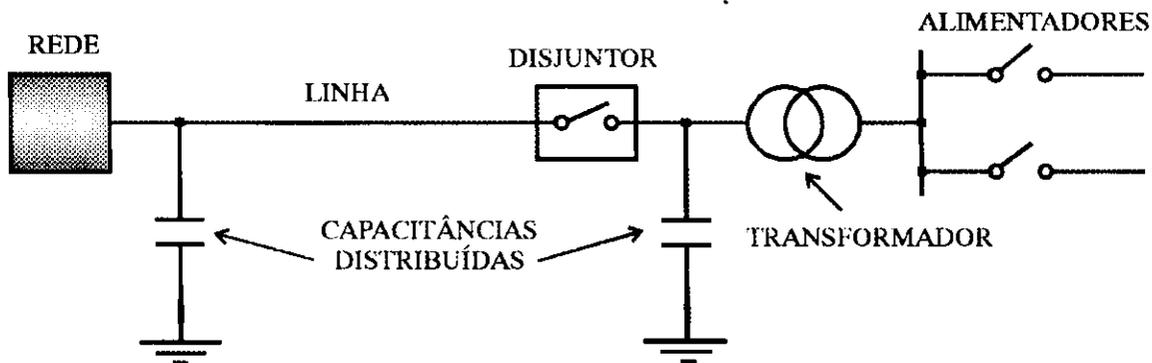


Fig. 1 - Situação de ferro-ressonância em um sistema de distribuição de energia elétrica.

Os condutores da rede possuem capacitâncias fase-terra distribuídas em paralelo. Após a abertura de um disjuntor ou fusível, ocorre uma mudança na configuração do circuito equivalente do sistema, de modo que uma capacitância em série é introduzida, propiciando o surgimento do fenômeno de ferro-ressonância.

2. Análise Fasorial do Fenômeno

A análise feita a seguir é restrita aos circuitos monofásicos com indutâncias saturáveis, cujas características de magnetização são levantadas em laboratório e fornecidas em valores *RMS* de tensão e de corrente de magnetização. Inicialmente, é assumido que as correntes e tensões não-senoidais podem ser substituídas por equivalentes senoidais de mesmo valor *RMS*. Assim, os efeitos considerados apenas se referem à frequência fundamental, não sendo levados em conta os efeitos das harmônicas e sub-harmônicas. O circuito a ser estudado é mostrado na Fig. 2.

O transformador é representado por uma indutância não-linear (desprezando-se o efeito de histerese), em paralelo com uma resistência, associada às perdas no núcleo do transformador. O diagrama fasorial deste circuito acha-se mostrado na Fig. 3.

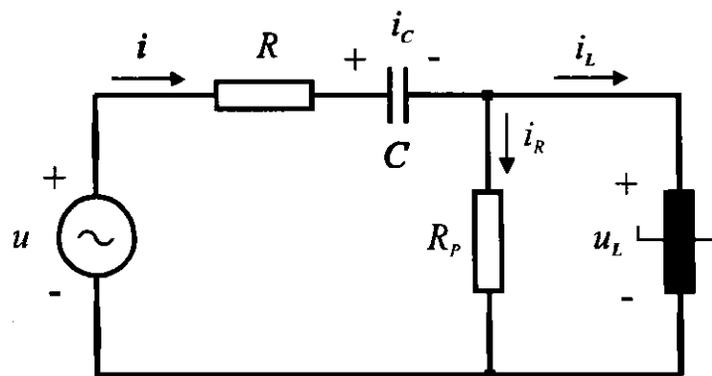


Fig. 2 - Circuito *RLC* não-linear com indutor saturável

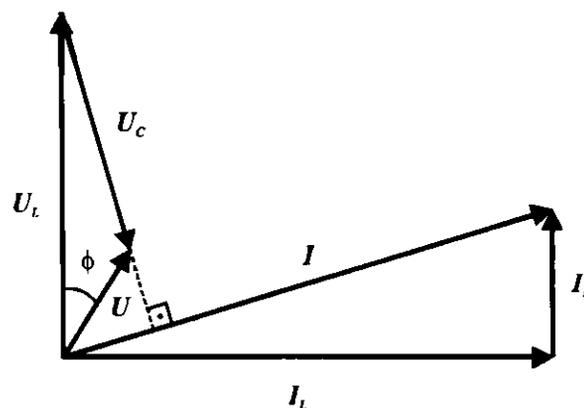


Fig. 3 - Diagrama fasorial do circuito da Fig. 2.

Para simplificar, as perdas resistivas serão desprezadas, fazendo-se $R = 0$ e $R_p = \infty$. Assim, o diagrama fasorial modifica-se, de modo que $I_R = 0$ e $I = I_L$. As tensões U e U_L passam a estar em fase entre si, ambas defasadas de 180° de U_C , como mostra a Fig. 4.

Neste caso, pode-se escrever para os módulos das tensões:

$$U_L = U + U_C = U + \frac{1}{\omega C} I \quad (1)$$

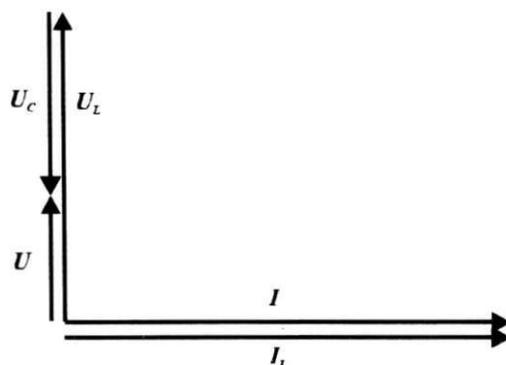


Fig. 4 - Diagrama fasorial para $R = 0$ e $R_p = \infty$.

Com base nesta equação, pode-se construir o gráfico da Fig. 5, onde é mostrado o ponto de operação inicial, P_1 . Este ponto corresponde à intersecção da reta descrita por (1), com a curva de magnetização do indutor, para uma tensão da fonte $U = U_1$.

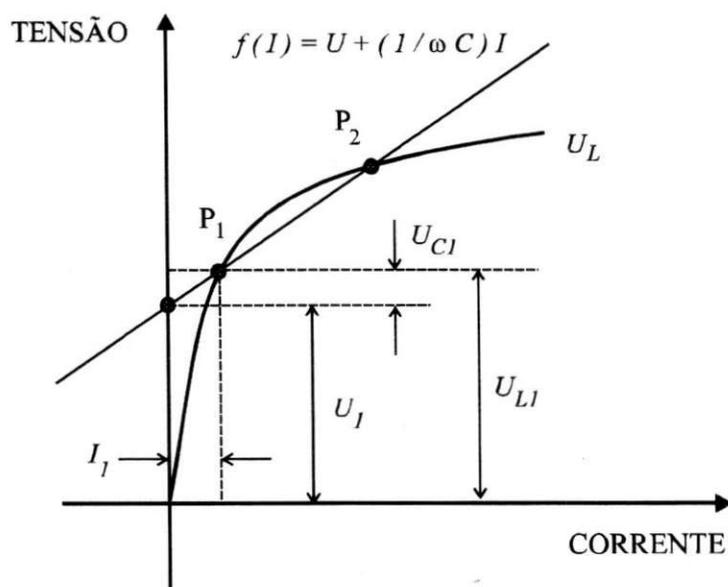


Fig. 5 - Condição de funcionamento estável de um circuito RLC em série não-linear.

Neste ponto de funcionamento estável, o circuito assume um comportamento predominantemente indutivo ($U_L > U_C$). Se ocorrer um aumento de U ou redução da frequência ω ou da capacitância C , o ponto de trabalho tende a se deslocar para cima. Entretanto, como P_1 acha-se próximo ao joelho da característica do indutor, pode ocorrer que as duas curvas não se interceptam no primeiro quadrante. De acordo com a Fig. 6 e com a Fig. 7, o novo ponto de operação passa a ser P_3 , situado no terceiro quadrante.

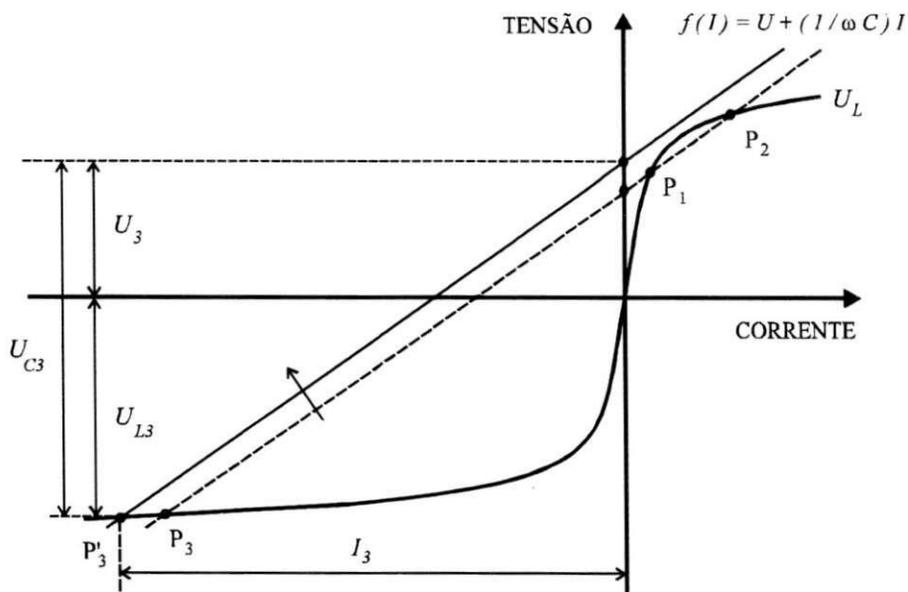


Fig. 6 - Comportamento de um circuito LC série não-linear com aumento de U .

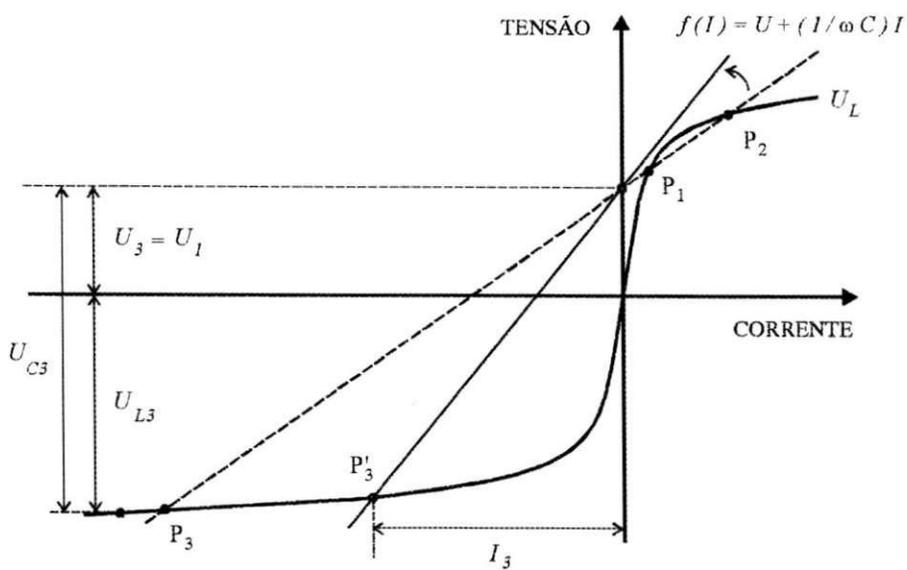


Fig. 7 - Comportamento de um circuito LC não-linear com redução de C ou de ω .

Deste modo, conclui-se que:

- O circuito muda bruscamente de comportamento, passando a predominar o efeito capacitivo (agora, $U_C > U_L$).
- Além da mudança súbita na fase da corrente, a amplitude também aumenta de I_1 para I_3 ;
- As tensões U_L e U_C assumem valores elevados, trazendo perigo à instalação.
- O aumento da tensão U_L provoca aumento de fluxo no núcleo magnético, fazendo crescer as perdas parasíticas, de modo a causar sobreaquecimento.

A Fig. 8 mostra o gráfico da tensão versus corrente, em módulo, para o indutor, capacitor e fonte, considerando um ajuste gradual da tensão desta última. Supondo um aumento gradual da tensão a partir de zero, observa-se que a corrente também aumenta gradualmente. No ponto 1, qualquer incremento de U implica num aumento abrupto de I e de U_C , havendo também um crescimento menos pronunciado de U_L . Assim, a variação do ponto de operação entre 1 e 3 é realizada de modo descontínuo, mudando o comportamento do circuito de indutivo ($U_L > U_C$) para capacitivo ($U_C > U_L$), do modo indicado pelas setas.

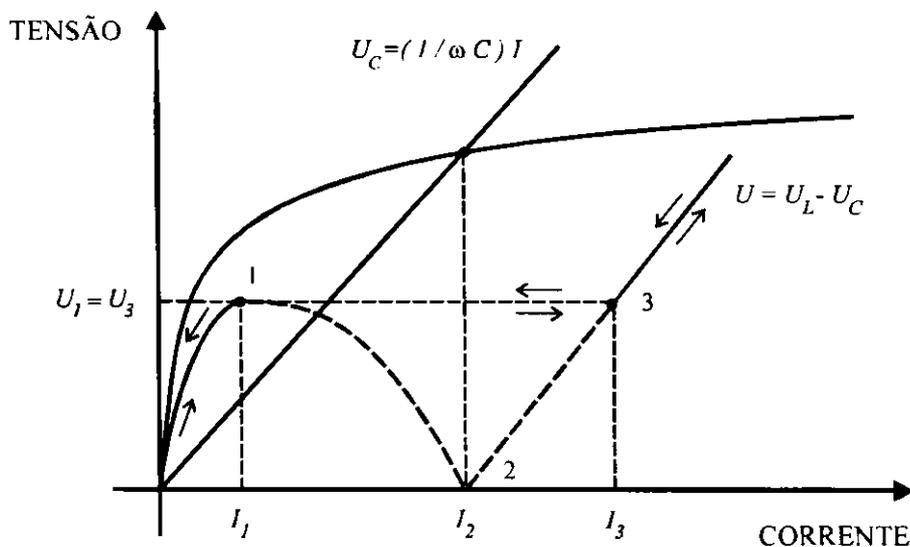


Fig. 8 - Variações das tensões em função da corrente em um circuito LC não-linear em série, considerando-se ω e C fixos e variando-se a tensão da fonte, U .

Supondo um aumento gradual da tensão a partir de zero, observa-se que a corrente também aumenta gradualmente. No ponto 1, qualquer incremento de U implica num

aumento abrupto de I e de U_C , havendo também um crescimento menos pronunciado de U_L . Assim, a variação do ponto de operação entre 1 e 3 é realizada de modo descontínuo, mudando o comportamento do circuito de indutivo ($U_L > U_C$) para capacitivo ($U_C > U_L$), do modo indicado pelas setas.

A determinação da capacitância necessária para ocorrência da ferro-ressonância pode ser realizada através do seguinte procedimento:

- Levanta-se em laboratório a curva U_L versus I do indutor;
- Traça-se uma reta tangente a essa curva, com coeficiente linear igual à tensão da fonte;
- Determina-se o valor do coeficiente angular $1 / (\omega C)$, e, a seguir, o valor de C .

A Fig. 9 descreve o procedimento adotado.

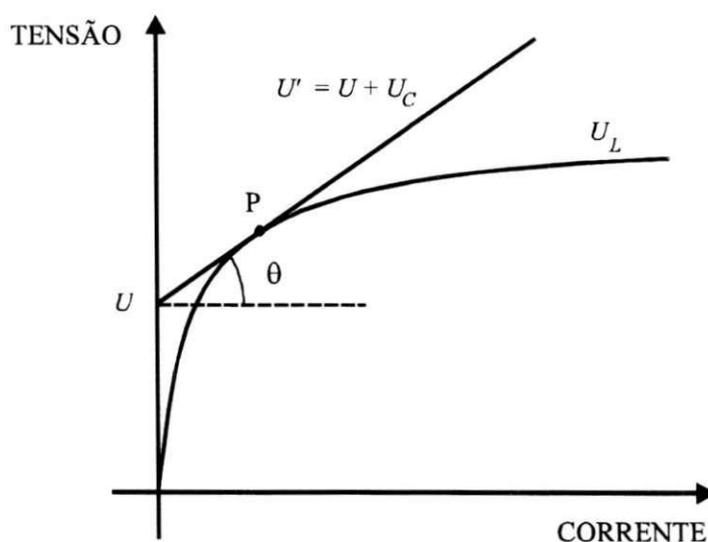


Fig. 9 - Método gráfico para determinação da capacitância necessária à produção de ferro-ressonância em um circuito LC série.

3. Equacionamento

Considerando o circuito da Fig. 2, pode-se escrever:

$$u(t) = R i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt + u_L(t) \quad (2)$$

Além disso, tem-se:

$$i(t) = i_R(t) + i_L(t) \quad (3)$$

$$u_L(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (4)$$

$$i_R(t) = \frac{u_L(t)}{R_p} \quad (5)$$

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (6)$$

Combinando essas equações, tem-se, após algumas manipulações algébricas:

$$\left(1 + \frac{R}{R_p}\right) \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \left(\frac{1}{R_p C} + \frac{R}{L_m}\right) \frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{1}{C} i_L(t) = \omega U_m \cos \omega t \quad (7)$$

$$i_L(\lambda) = f(\lambda) = a\lambda + b\lambda^n \quad (8)$$

$$\frac{1}{L_m} = \frac{di_L(\lambda)}{d\lambda} \quad (9)$$

A função polinomial f descreve a curva de saturação, dada em termos dos valores de pico da corrente de excitação e do fluxo de enlace no enrolamento primário do transformador. O expoente n é inteiro e ímpar.

Considerando as variáveis auxiliares Y_1 e Y_2 , faz-se:

$$Y_1 = \lambda(t) \quad (10)$$

$$Y_2 = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (11)$$

Assim, tem-se o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\frac{dY_1}{dt} = Y_2 \quad (12)$$

$$\frac{dY_2}{dt} = \omega U_m \cos \omega t - \frac{\frac{1}{R_p C} + \frac{R}{L_m}}{1 + \frac{R}{R_p}} Y_2 - \left(1 + \frac{R}{R_p}\right) \frac{1}{C} f(Y_1) \quad (13)$$

As tensões no indutor, no capacitor e no resistor e a corrente são dadas por:

$$u_L(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} = Y_2 \quad (14)$$

$$u_R(t) = Ri(t) = R[i_R(t) + i_L(t)] = R \left[\frac{u_L(t)}{R_p} + R f(Y_1) \right] = \frac{R}{R_p} Y_2 + R f(Y_1) \quad (15)$$

$$u_c(t) = u(t) - u_L(t) - u_R(t) = U_m \sin \omega t - \left(1 + \frac{R}{R_p}\right) Y_2 + R f(Y_1) \quad (16)$$

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} = C \left[\omega U_m \cos \omega t - \left(1 + \frac{R}{R_p}\right) \frac{dY_2}{dt} + R \frac{df(Y_1)}{dt} \right] = \frac{Y_2}{R_p} + f(Y_1) \quad (17)$$

As condições iniciais do circuito são:

$$Y_1(0) = \lambda(0) \quad (18)$$

$$Y_2(0) = U_L(0) \quad (19)$$

Se $u_L(t) = U_{Lm} \text{sen}(\omega t + \phi)$, tem-se que:

$$u_L(0) = U_{Lm} \text{sen} \phi = \sqrt{2} U_L \text{sen} \phi \quad (20)$$

Como $\lambda(t) = \int u_L(t) dt = -\frac{U_{Lm}}{\omega} \cos(\omega t + \phi)$, tem-se:

$$\lambda(0) = -\frac{\sqrt{2} U_L}{\omega} \cos \phi \quad (21)$$

A solução do sistema formado por (14) e (15) pode ser obtida pelo método de Runge-Kutta de quarta-ordem, com condições iniciais tais que o circuito seja levado ao limiar da ferro-ressonância.

4. Resultados Obtidos

4.1 Caracterização do Transformador Monofásico

O transformador monofásico utilizado apresenta os seguintes valores nominais:

- Potência nominal: 100 VA.
- Tensões nominais dos enrolamentos primário e secundário: 48 / 220 V.

A resistência do enrolamento de 48 V foi medida através de um ohmímetro, sendo determinado o valor $R = 2,2 \Omega$. Por se tratar de um transformador de pequeno porte, a reatância dos enrolamentos pode ser desprezada.

Na determinação da característica fluxo de enlace *versus* corrente de magnetização do transformador, utilizou-se a montagem da Fig. 10, classicamente utilizada.

A curva resultante acha-se mostrada na Fig. 11.

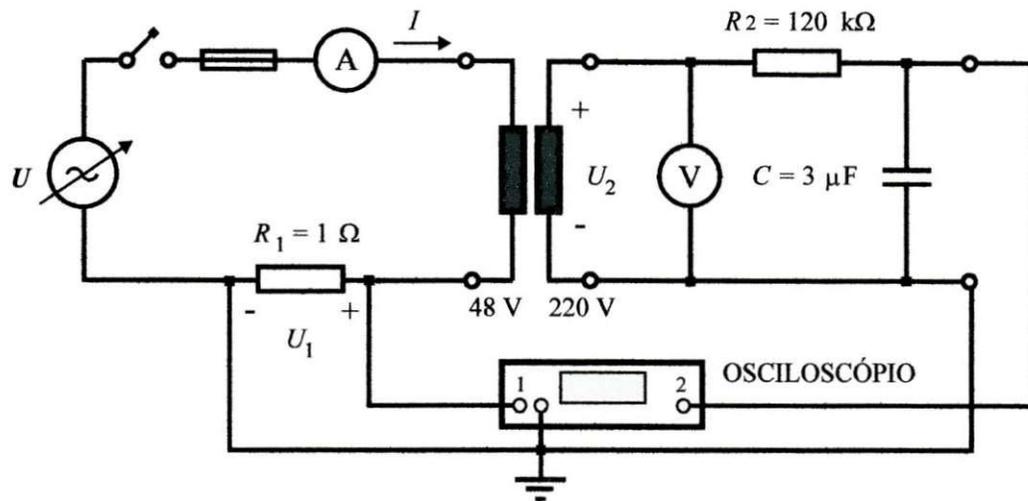


Fig. 10 - Montagem para determinação da curva de magnetização $\lambda - i_L$

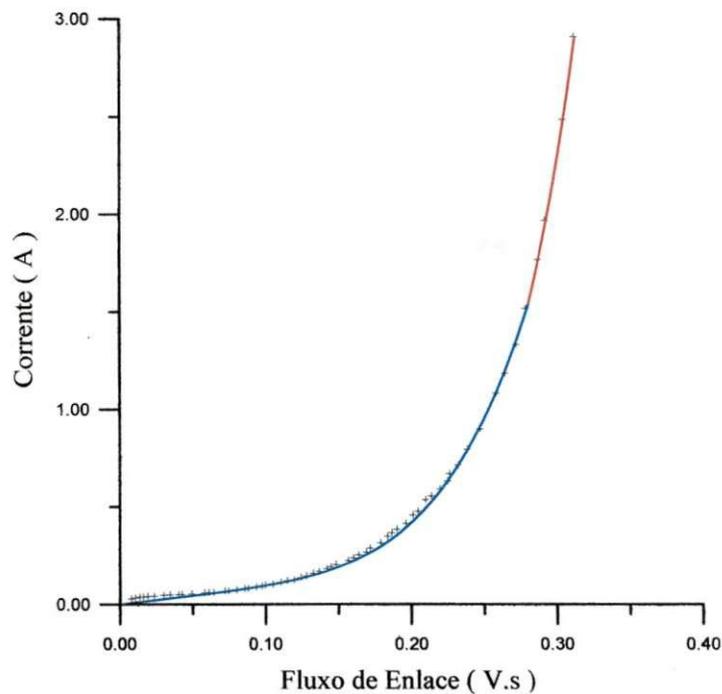


Fig. 11 - Pontos da curva de saturação $\lambda - i_L$, obtidos em ensaio, e curva aproximadamente.

Aos pontos obtidos no ensaio, ajustou-se uma curva através do *software* LABFit, disponível na rede. Assim, determinou-se a seguinte combinação de funções:

$$i_L = 0,9\lambda + 750\lambda^5 \quad , \quad \lambda \leq 0,28 \quad (22)$$

$$i_L = 1,36\lambda + 8630\lambda^7 \quad , \quad \lambda > 0,28 \quad (23)$$

Os laços de histerese, obtidos para $U = 38,5$ V, são mostrados na Fig. 12.

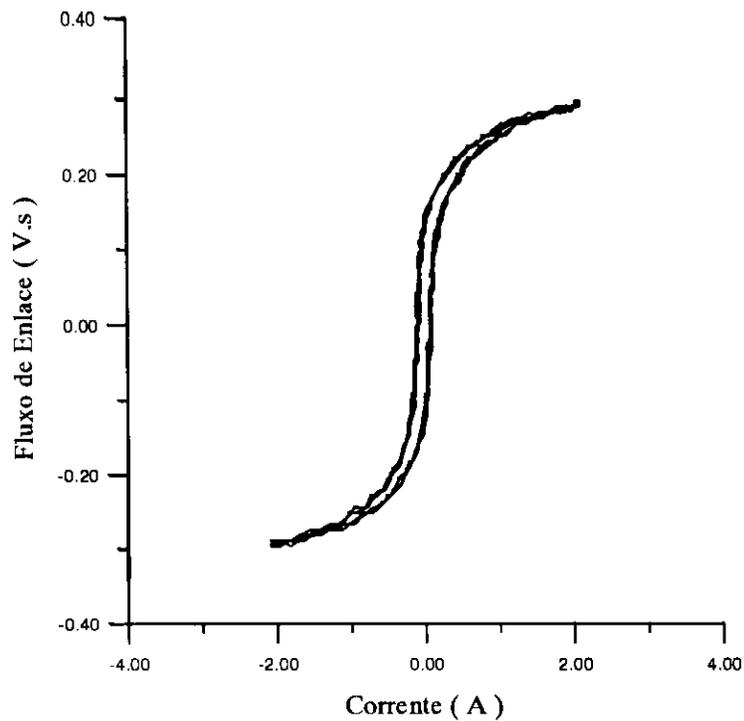


Fig. 12 - Laço de histerese para $U = 38,5$ V.

Para determinar a resistência de perdas, utilizou-se a montagem da Fig. 13.

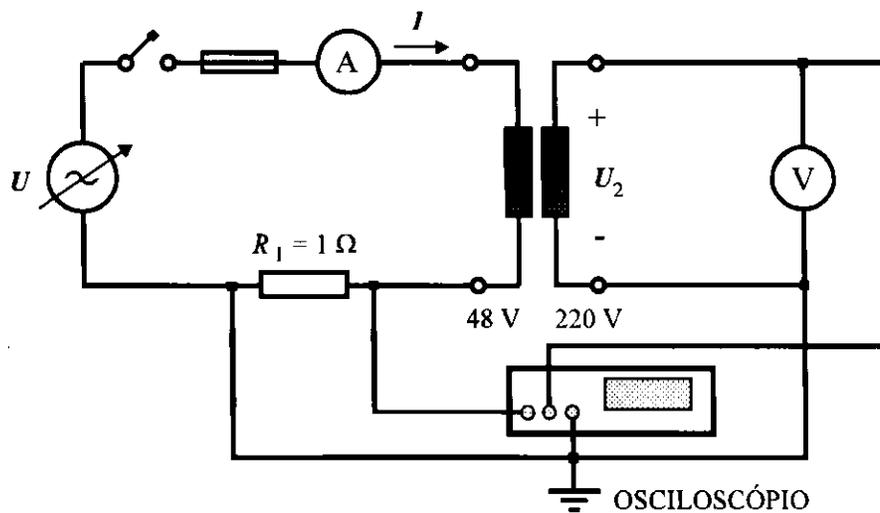


Fig. 13 - Montagem para determinação da resistência de perdas, R_P .

O osciloscópio de memória digital utilizado possui funções que permitem multiplicar dois sinais quaisquer, bem como calcular o valor médio do produto obtido, assim, torna-se possível medir a potência correspondente às perdas magnéticas no núcleo do transformador.

Tomou-se a tensão no lado do secundário no sentido de evitar a inclusão das perdas ôhmicas no enrolamento primário do transformador.

A tensão no lado de 220 V foi variada na faixa de 0 a 320 V, obtendo-se os valores de perdas indicados na Tabela 1, mostrados em função da tensão variável no lado de 48 V.

Tabela 1 - Valores de perdas magnéticas em função da tensão no lado de 48 V.

U (V)	10	20	30	40	50	60	70
P (W)	0,115	0,444	0,863	1,460	2,222	3,040	4,568

A variação de P em função de U^2 é mostrada na Fig. 14.

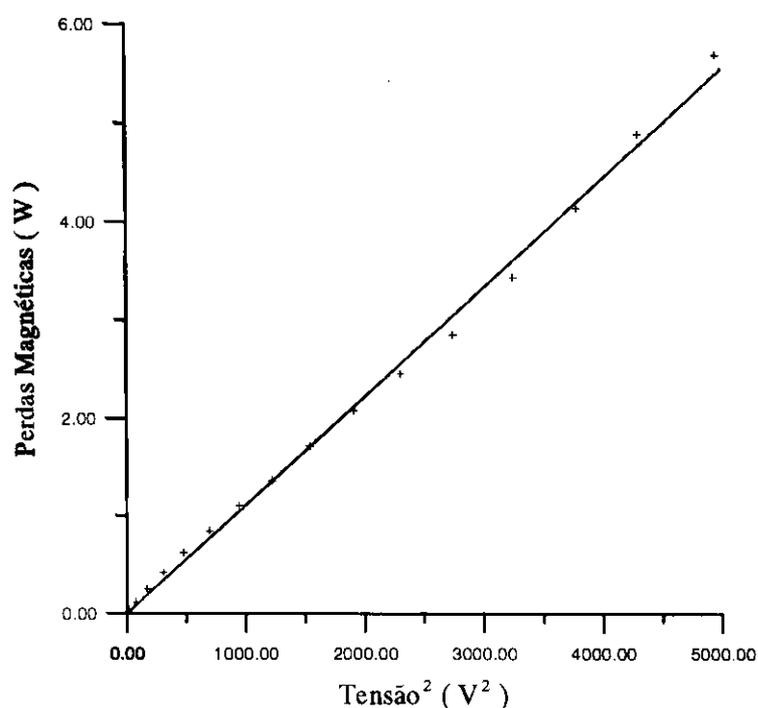


Fig. 14 - Perdas magnéticas no núcleo em função do quadrado da tensão no lado de 48V.

Como $P = U^2 / R$, obtém-se R pelo cálculo do inverso do coeficiente angular da reta da Fig. 14, ajustada aos pontos obtidos pelo software LABFit. Com isto, obtém-se $R = 902,5\Omega$.

4.2 Determinação das Condições Iniciais

Na determinação das condições iniciais para o estabelecimento da ferro-ressonância, especificadas no item 1.3, utilizou-se a montagem da Fig. 15. A tensão de entrada foi gradualmente variada de 0 até o valor que produzisse o fenômeno. Após várias tentativas,

foram estabelecidos com precisão máxima os valores limite de tensão no indutor, U_L , e a defasagem ϕ entre U_L e U (tensão na fonte). Para cada um desses valores, foram obtidos os conjuntos de condições iniciais mostrados na Tabela 2.

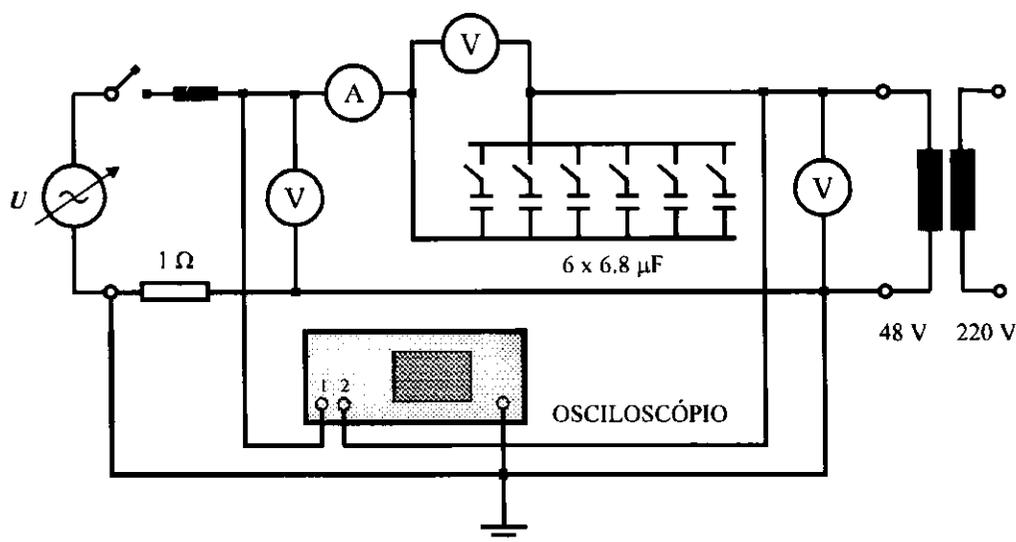


Fig. 15 - Montagem para determinação das condições iniciais.

Tabela 2 - Condições iniciais para o estabelecimento da ferro-ressonância.

C (μF)	4 x 6.8		6 x 6.8	
	REGIME NORMAL	FERRO-RESSONÂNCIA	REGIME NORMAL	FERRO-RESSONÂNCIA
U (V)	32,0	31,4	38,5	37,4
U_L (V)	45,5	79,3	52,3	86,5
U_C (V)	15,1	109,4	15,5	122,5
I (A)	0,13	0,890	0,21	1,48
ϕ ($^\circ$)	- 47,0	91,2	- 53,4	100,0

4.3 Medições de Tensões e Correntes

Um programa em *FORTRAN* foi feito para simular o fenômeno da ferro-ressonância em um circuito *RLC* série. A listagem do mesmo encontra-se no ANEXO. Os oscilogramas de tensões e correntes obtidos por simulação e em laboratório são mostrados a seguir. O degrau de tempo utilizado foi de 1×10^{-5} .

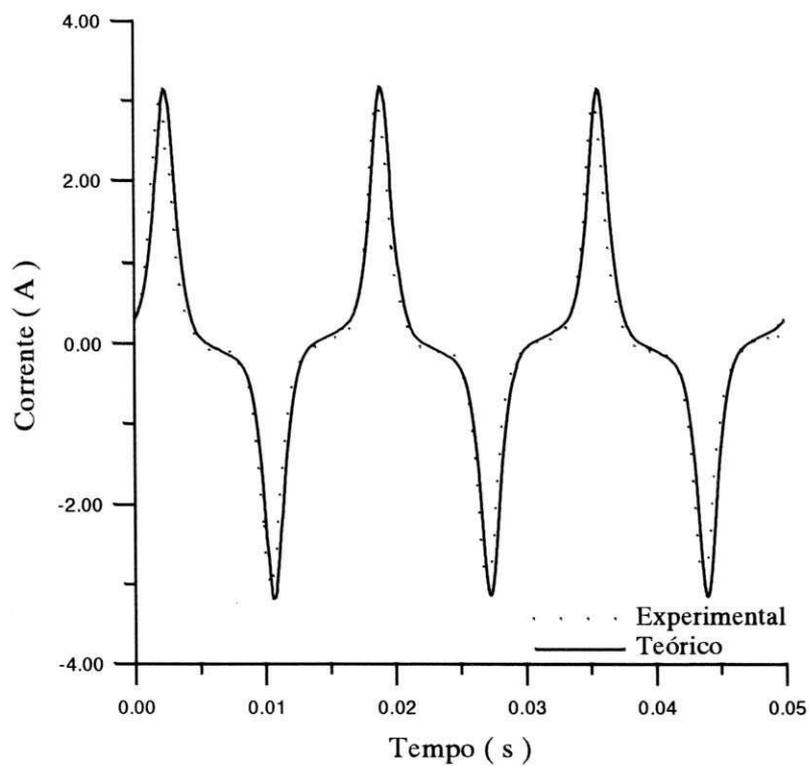


Fig. 16 - Corrente de excitação, i , para $C = 27,2 \mu F$.

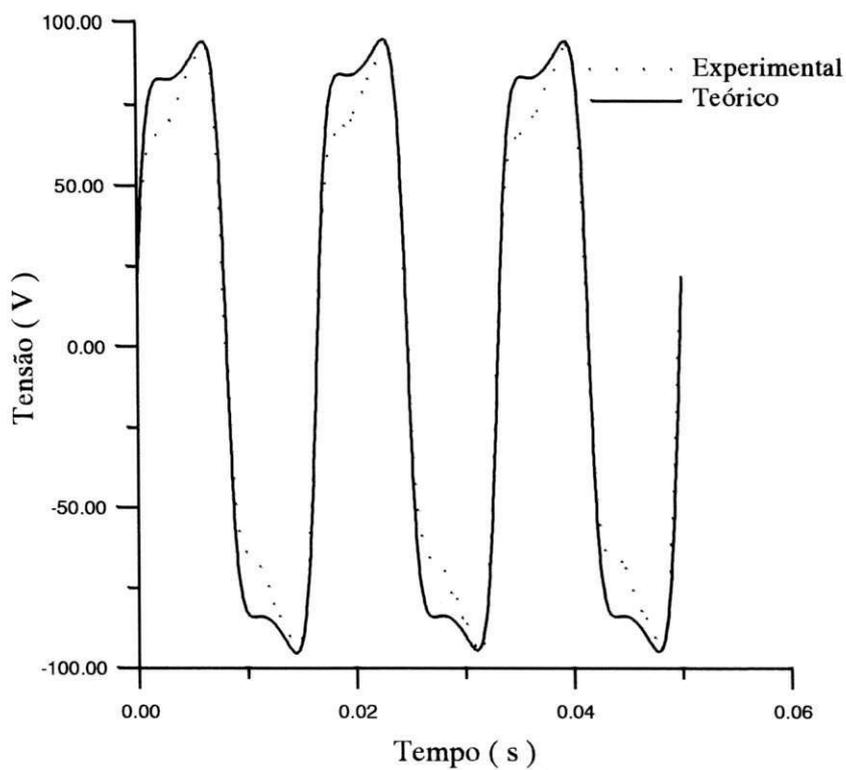


Fig. 17 - Tensão no indutor, U_L , para $C = 27,2 \mu F$.

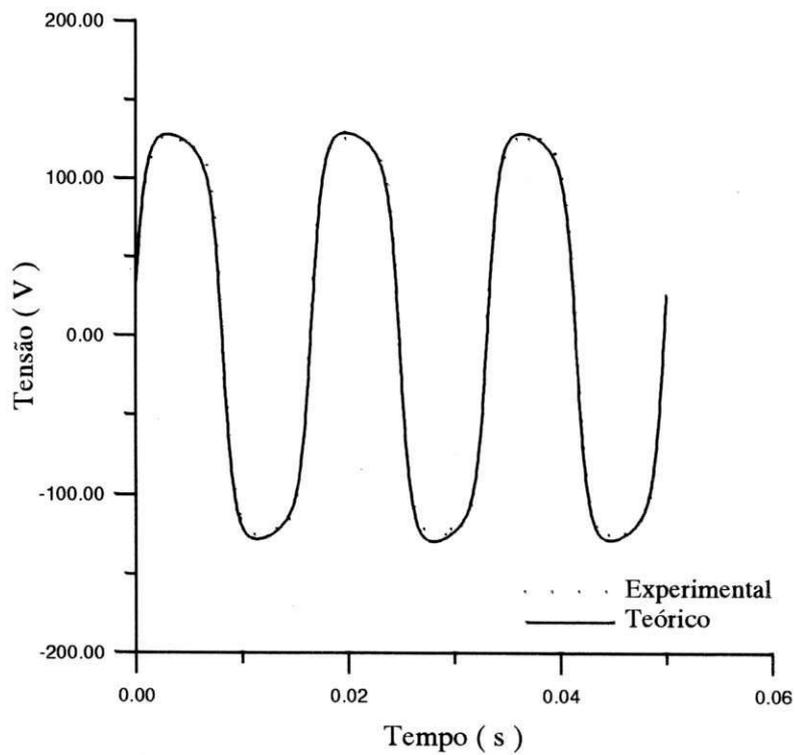


Fig. 18 - Tensão no capacitor, U_C , para $C = 27,2 \mu F$.

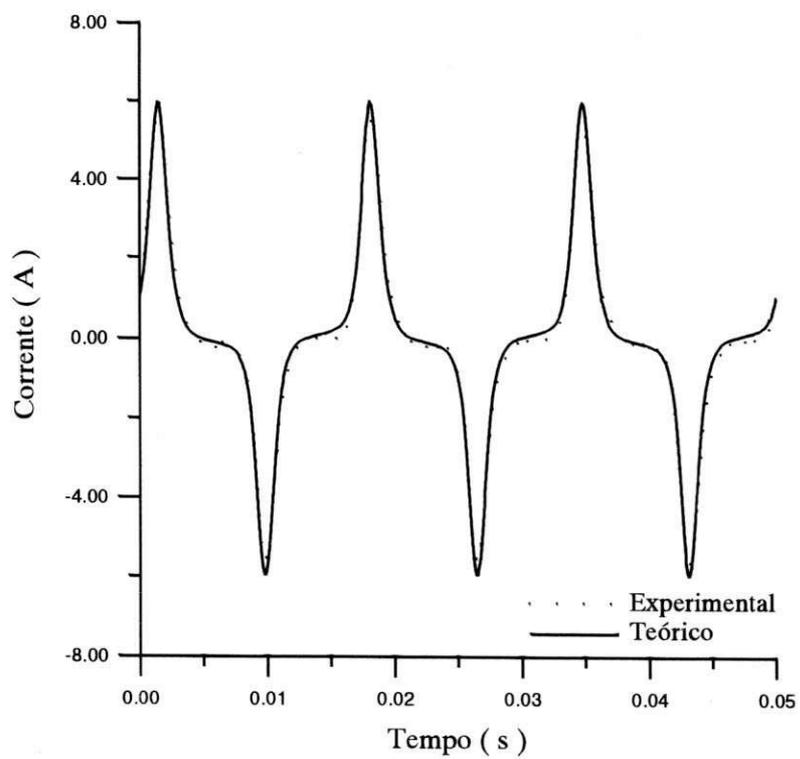


Fig. 19 - Corrente de excitação, para $C = 40,8 \mu F$

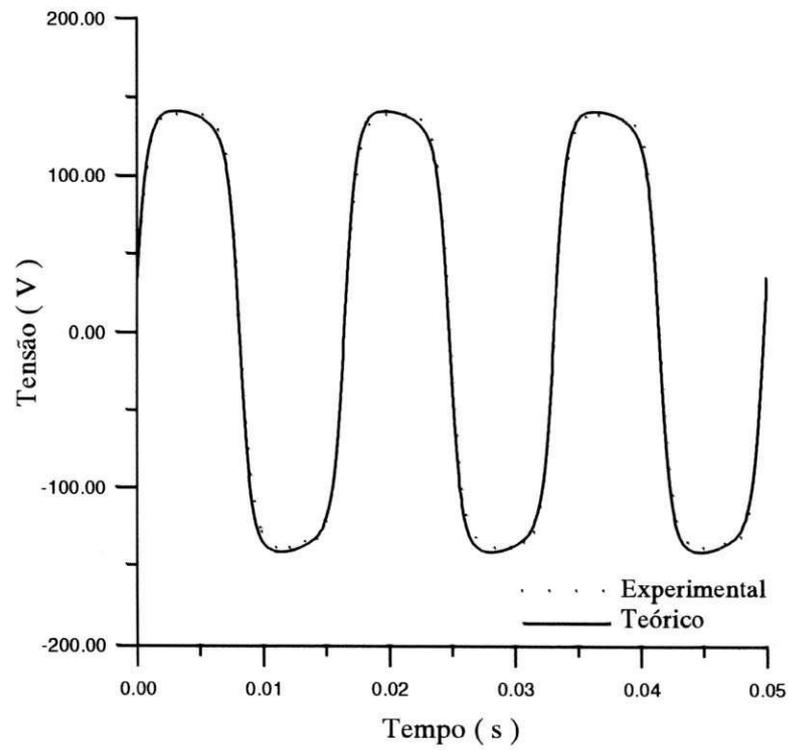


Fig. 20 - Tensão no capacitor, U_C , para $C = 40,8 \mu\text{F}$.

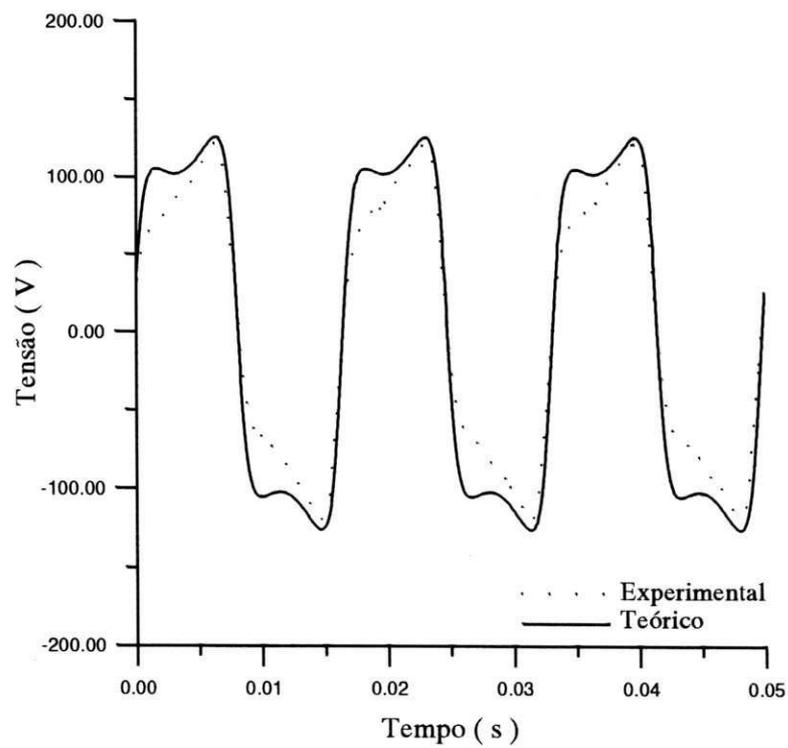


Fig. 21 - Tensão no indutor, U_L , para $C = 40,8 \mu\text{F}$.

A variação do fluxo de enlace em função da corrente de excitação é mostrada na Fig. 22. Pode-se dizer que a mesma apresenta um caráter pseudo-histerético, uma vez que é parecida com laço de histerese real. Entretanto, deve ser lembrado que este fenômeno não foi considerado na representação do núcleo magnético. Tal semelhança deve-se à representação das perdas parasíticas pelo resistor de perdas em derivação.

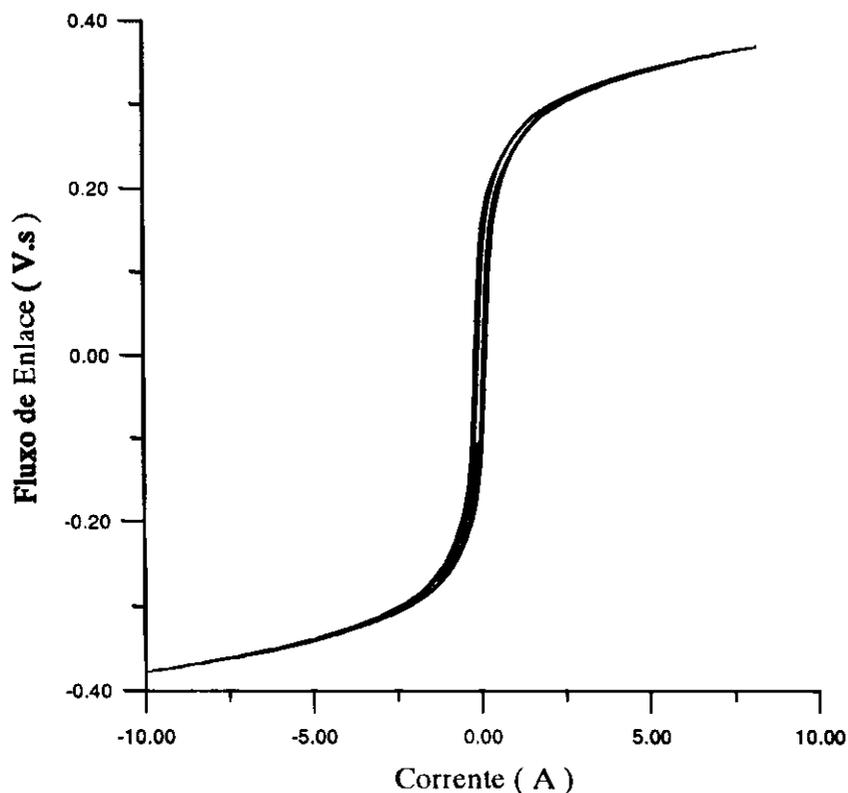


Fig. 22 - Fluxo de enlace em função da corrente de excitação.

5. Conclusões

Apresentou-se um método de cálculo de ferro-ressonância em um transformador monofásico com secundário em vazio, onde foi representada a característica não-linear do núcleo magnético mediante polinômio truncado de ordem 7, ajustado a partir de pontos obtidos por ensaio. O efeito das correntes parasitas foi considerado através de um resistor em derivação, calculado a partir de medições de perdas no núcleo. A equação diferencial de segunda ordem que representa o modelo foi resolvida pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, mediante um programa em linguagem FORTRAN, apresentado em anexo. As

condições iniciais correspondentes ao limite entre os estados de operação normal e de ferro-ressonância também foram determinadas por ensaio.

O fenômeno da histerese magnética não foi levado em consideração no estudo de ferro-ressonância, sendo possivelmente este um dos motivos que influenciaram nas discrepâncias entre os valores obtidos por simulação e os obtidos em laboratório. Outros fatores que exerceram influência nesses desvios foram: a imprecisão no levantamento da curva de saturação, a dificuldade de se ajustar a tensão da fonte no valor limite entre a condição normal de funcionamento do circuito e a condição de ferro-ressonância, as tolerâncias dos valores das componentes e os erros de medição característicos dos instrumentos.

Como continuidade deste trabalho, sugiro a modelagem precisa do efeito de histerese na representação do núcleo magnético do transformador.

Referências Bibliográficas

- [1] Guerra, F. C. F., Proteção de Sistemas Elétricos, Notas de Aula, DEE / UFCG, Campina Grande, PB.
- [2] Oliveira, J. T., Análise Trifásica do Fenômeno de Ferro-Ressonância, Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- [3] Portela, C. M. e Oliveira, J. T., Análise Trifásica do Fenômeno de Ferro-ressonância, XII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, CIGRÉ / CHESF, Recife – PE, 1993.
- [4] Amon F., J. *et al.*, Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, FURNAS / EDUFF, 1987.
- [5] Naidu, S. R., Um Estudo do Fenômeno de Histerese Magnética e sua Inclusão no Cálculo de Sobretensões em Sistemas Elétricos de Potência. DEE / UFPB, Campina Grande – PB, 1995.

ANEXO

C-----
 CÁLCULO DO FLUXO MAGNÉTICO, TENSÕES E CORRENTE EM UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM SECUNDÁRIO EM ABERTO EM REGIME DE FERRO-RESSONÂNCIA (CAPACITÂNCIA EM SÉRIE). CONSIDERA-SE A RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO E AS PERDAS NO NÚCLEO. A CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DO NÚCLEO É REPRESENTADA POR UM POLINÔMIO DO TIPO $i = a \cdot \phi + b \cdot \phi^n$.

C-----
 RESOLVE-SE UMA EQUAÇÃO DIFERENCIAL ORDINÁRIA NÃO-LINEAR DE ORDEM 2 PELO MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE QUARTA ORDEM.

C-----
 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
 REAL*8 Y(10),YI(10),TP(500000),CM(500000),CR(500000),UI(500000),
 *UC(500000),FL(500000)

C-----
 C ARQUIVOS DE SAÍDA

C-----
 C FL2-TP - FLUXO DE ENLACE VERSUS TEMPO.
 C UL2-TP - TENSÃO NO ENROLAMENTO PRIMÁRIO VERSUS TEMPO.
 C UC2-TP - TENSÃO NO CAPACITOR VERSUS TEMPO.
 C CM2-TP - CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO VERSUS TEMPO.
 C CE2-TP - CORRENTE DE EXCITAÇÃO VERSUS TEMPO.
 C FL2-CM - FLUXO DE ENLACE VERSUS CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO.
 C FL2-CE - FLUXO DE ENLACE VERSUS CORRENTE DE EXCITAÇÃO.

C-----
 OPEN(5,FILE = 'FL2-TP.DAT')
 OPEN(10,FILE = 'UL2-TP.DAT')
 OPEN(15,FILE = 'UC2-TP.DAT')
 OPEN(20,FILE = 'CM2-TP.DAT')
 OPEN(25,FILE = 'CE2-TP.DAT')
 OPEN(30,FILE = 'FL2-CM.DAT')
 OPEN(35,FILE = 'FL2-CE.DAT')

C-----
 WRITE(*,*) 'TEMPO TOTAL DE SIMULACAO (s)'
 READ (*,*) TT
 WRITE(*,*) ' '
 WRITE(*,*) 'DEGRAU DE TEMPO DT (s)'
 READ (*,*) DT
 WRITE(*,*) ' '
 WRITE(*,*) 'NUMERO DE ITERACOES DENTRO DE CADA INTERVALO DT'
 READ (*,*) IT
 WRITE(*,*) ' '
 WRITE(*,*) 'VALOR FREQUENCIA DE ALIMENTACAO (V)'
 READ (*,*) F

```

WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'VALOR RMS DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (V)'
READ (*,*) UE
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'VALOR RMS DA TENSÃO NO INDUTOR (V)'
READ (*,*) UL
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'DEFASAGEM ENTRE A TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO'
WRITE(*,*) ' E A TENSÃO DE NO INDUTOR (GRAUS) '
READ (*,*) FI
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'VALOR DA CAPACITANCIA (F)'
READ (*,*) C
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'VALOR DA RESISTENCIA DOS ENROLAMENTOS (OHMS)'
READ (*,*) R
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'VALOR DA RESISTENCIA DE PERDAS DO NUCLEO(OHMS)'
READ (*,*) RP
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'GRAU DO POLINOMIO CORR=a1*FLUX+b1*FLUX**n1(PARTE1)'
READ (*,*) N1
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'COEFICIENTE a DO POLINOMIO'
READ (*,*) A1
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'COEFICIENTE b DO POLINOMIO'
READ (*,*) B1
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'GRAU DO POLINOMIO CORR=a2*FLUX+b2*FLUX**n2(PARTE2)'
READ (*,*) N2
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'COEFICIENTE a DO POLINOMIO'
READ (*,*) A2
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'COEFICIENTE b DO POLINOMIO'
READ (*,*) B2
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) 'FLUXO DE ENLACE NO PONTO DE JUNCAO DOS POLINOMIOS'
READ (*,*) FK
WRITE(*,*) ' '

```

C-----

$$PI = 4.D0 * DATAN(1.D0)$$

$$FI = FI * PI / 180.D0$$

$$W = 2.D0 * PI * F$$

$$UP = DSQRT(2.D0) * UE$$

$$NP = TT / DT$$

C

C CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS

C

T = 0.D0

YI(1)=-DSQRT(2.D0)*(UL/W)*DCOS(FI)

YI(2)= DSQRT(2.D0)*UL*DSIN(FI)

FL(1)= YI(1)

UI(1)= YI(2)

UC(1)=-YI(2)

IF(DABS(Y(1)),LE.FK) CM(1)=A1*YI(1)+B1*YI(1)**N1

IF(DABS(Y(1)),GT.FK) CM(1)=A2*YI(1)+B2*YI(1)**N2

CR(1)= CM(1)+YI(2)/RP

C

C CÁLCULO E ARMAZENAMENTO DOS VALORES DE FLUXO E DE CORRENTE

C

DO 20 K=2,NP

CALL RK4(T,YI,CMM,2,T+DT,IT,Y,R,RP,C,UP,W,

*A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)

FL(K)= Y(1)

UI(K)= Y(2)

CM(K)= CMM

CR(K)= CMM+Y(2)/RP

UC(K)= UP*DSIN(W*T)-Y(2)-R*CR(K)

TP(K)= T

YI(1)= Y(1)

YI(2)= Y(2)

T = T+DT

20 CONTINUE

C

C IMPRESSÃO DO FLUXO,TENSÕES E CORRENTE VERSUS TEMPO

C

DO 30 J=1,NP,100

WRITE(5,40) TP(J),FL(J)

WRITE(10,40) TP(J),UI(J)

WRITE(15,40) TP(J),UC(J)

WRITE(20,40) TP(J),CM(J)

WRITE(25,40) TP(J),CR(J)

WRITE(30,40) CM(J),FL(J)

WRITE(35,40) CR(J),FL(J)

30 CONTINUE

C

40 FORMAT(1X,D15.6,4X,D15.6)

C

STOP

END

```

C-----
C  MÉTODO DE RUNGE KUTTA DE ORDEM 4
C-----
C  SUBROUTINE RK4(TI,YIN,CMM,NN,TF,IT,Y,R,RP,C,UP,W,
* A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)
C
C  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 Y(10),YIN(10),YT(10),D1(10),D2(10),D3(10),D4(10)
C
C  HIT=IT
DT=(TF-TI)/HIT
DT2=DT/2.
DT6=DT/6.
T=TI
C
C  DO 10 I=1,NN
Y(I)=YIN(I)
10 CONTINUE
DO 50 J=1,IT
CALL DERIV(T,Y,CMM,D1,R,RP,C,UP,W,A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)
DO 20 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D1(I)*DT2
20 CONTINUE
T=T+DT2
CALL DERIV(T,YT,CMM,D2,R,RP,C,UP,W,A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)
DO 30 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D2(I)*DT2
30 CONTINUE
CALL DERIV(T,YT,CMM,D3,R,RP,C,UP,W,A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)
DO 40 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D3(I)*DT
40 CONTINUE
T=T+DT2
CALL DERIV(T,YT,CMM,D4,R,RP,C,UP,W,A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)
DO 50 I=1,NN
Y(I)=Y(I)+(D1(I)+2.*(D2(I)+D3(I))+D4(I))*DT6
50 CONTINUE
C
C  RETURN
END
C-----
C  CÁLCULO DA DERIVADA DO FLUXO DE ENLACE EM RELAÇÃO AO TEMPO
C-----
C  SUBROUTINE DERIV(T,Y,CM,D,R,RP,C,UP,W,A1,B1,N1,A2,B2,N2,FK)

```

```
C
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  REAL*8 Y(10),D(10)
C
  C1 =1.D0+R/RP
  C2 =R*DM+1.D0/(RP*C)
  C3 =1.D0/C
  IF(DABS(Y(1)).LE.FK) THEN
    CM =A1*Y(1)+B1*Y(1)**N1
    DM =A1+N1*B1*Y(1)**(N1-1)
  ENDIF
  IF(DABS(Y(1)).GT.FK) THEN
    CM =A2*Y(1)+B2*Y(1)**N2
    DM =A2+N1*B2*Y(1)**(N2-1)
  ENDIF
  D(1)=Y(2)
  D(2)=(W*UP*DCOS(W*T)-C2*Y(2)-C3*CM)/C1
C
  RETURN
  END
C-----
```